

давления на решетке воздух вследствие пониженного (по сравнению со слоем) сопротивления внутренней полости трубки с большой скоростью устремляется внутрь ее, и в результате эжекции происходит интенсивный подсос твердых частиц из пространства, примыкающего к нижнему торцу трубки. Дисперсная среда без дополнительной затраты энергии движется вверх по каналу сплошным потоком или поршнями, идущими друг за другом. Следовательно, квазикапиллярный эффект – явление самопроизвольного подъема твердых частиц в узкой трубке, погруженной в неподвижный продуваемый зернистый слой, возникает вследствие того, что среднее значение порозности зернистого слоя у стенки больше, чем вдали от нее. Это приводит к уменьшению сопротивления этой части слоя и увеличению скорости через нее. Чем большая доля сечения трубки занята слоем с повышенной порозностью, то есть имеет меньшее сопротивление, тем квазикапиллярный эффект значительнее.

### **Список использованных источников**

1. Королев В. Н., Амарская И. Б., Бармина О. А., Островская А. В., Красных В. Ю. Способ удаления мелких частиц из крупнозернистого слоя сыпучих материалов. Патент 2594494 РФ, МПК В07В 4/08. Оpubл. 25.07.2016. Бюл. №23.

4. Королев В.Н., Марков В.А., Нагорнов С.А., Парышев И.С. Квазикапиллярный эффект в неподвижном продуваемом зернистом слое // Инженерно-физический журнал. 2018. Т.91. № 1. С. 256-259.

2. Королев В.Н., Сыромятников Н.И., Толмачев Е.М. Структура неподвижного и псевдооживленного слоя зернистого материала вблизи погруженной в него поверхности (стенки) // Инженерно-физический журнал, 1971. Т. 21. № 5. С. 973-978.

3. Бувеч Ю.А., Королев В.Н., Сыромятников Н.И. Обтекание тел и внешний теплообмен в псевдооживленных средах. – Свердловск: изд-во Урал. ун-та, 1991. – 188 с.

УДК 669.16.228.001.57

**Е. Ю. Астанин, Е. В. Киселев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИКИ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА КАМЕРНОЙ ПЕЧИ СО СТАЦИОНАРНЫМ ПОДОМ, С ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ ГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ**

### **Аннотация**

*Камерные печи в основном предназначены для выполнения термообработки (закалки и высокого отпуска) деталей общего машиностроения. Камерные печи очень важны, так как позволяют проводить качественную термообработку металла и выдерживать определенные тепловые режимы. Качественный камерный нагрев играет большую роль в металлургии,*

так как позволяет повысить качество выпускаемого металла. Подготовительные действия выполнялись на стадии подготовки деталей в пакете КОМПАС-3D. Проведено моделирование газодинамики рабочего пространства камерной печи со стационарным подом, с горизонтальной установкой горелочных устройств фирмы «Elster Kromschroder», при помощи SolidWorks, а именно модуля SolidWorks Flow Simulation. Была получена траектория движения газозоудушной смеси, которая свидетельствует о целесообразности использования данного метода установки горелочных устройств, но при этом имея свои недостатки.

**Ключевые слова:** камерная печь, горелочные устройства, газ, воздух, модель, траектория, SolidWorks Flow Simulation.

#### Abstract

Chamber furnaces are mainly designed for heat treatment (hardening and high tempering) of general engineering items. Chamber furnaces are very important, since they allow performing high-quality heat treatment of metal and withstand certain thermal conditions. Qualitative chamber heating plays an important role in metallurgy, since it allows to improve the quality of the produced metal. Preparatory actions are carried out at the stage of preparation of details in the KOMPAS-3D package. Modeling of gasdynamics of working space of a chamber furnace with a stationary hearth, with horizontal installation of burners from «Elster Kromschroder», using SolidWorks, namely the module SolidWorks Flow Simulation, is carried out. The trajectory of the gas-air mixture was obtained, which indicates the expediency of using this method of installing burner devices, but at the same time having their own shortcomings.

**Key words:** chamber furnace, burners, gas, air, model, trajectory, SolidWorks Flow Simulation.

**Характеристика объекта.** Печь предназначена для выполнения термообработки (закалки и высокого отпуска) деталей общего машиностроения. По своему типу печь является камерной со стационарным подом. Площадь пода составляет  $2,0 \times 2,7 = 5,4 \text{ м}^2$ . Высота рабочего пространства печи 1 метр. Рабочее пространство печи представляет собой прямоугольную камеру, стены и свод которой футерованы керамоволокнистым материалом НПС с классификационной температурой применения  $1260^\circ\text{C}$  и с температурой длительного применения не более  $1150^\circ\text{C}$ . Футеровка пода печи состоит из огнеупорного слоя и теплоизоляции. Огнеупорный слой выполнен из штучных огнеупоров, а теплоизоляция – из кальциум-силикатной плиты. В качестве топлива используется природный газ. Максимальная рабочая температура в печи  $1070^\circ\text{C}$ . Воздухоснабжение печи осуществляется от вентилятора. Дымовые газы удаляются из печи через рекуперативные горелки, расположенные в торцевой стенке, и далее по дымопроводу попадают в дымосос, соединенный с газоходом. Печь оснащена автоматической системой управления тепловым режимом. Загрузка садки осуществляется существующим загрузочным устройством на подставки. При посадке изделий на загрузочную машину необходимо строго соблюдать их соосность с фронтом печи, в которую будет осуществляться загрузка. После загрузки металла в печь, заслонка опускается, после чего выполняется нагрев садки до заданной температуры с необходимой скоростью. После того, как металл нагрет до заданной температуры, выполняется технологическая выдержка, длительность которой определяется технологами цеха, и затем производят охлаждение металла, либо вместе с печью, либо заслонка открывается, и металл выгружается из печи. Перекрытие загрузочного окна осуществляется за счет подъемной заслонки, оснащенной механизмом поднятия. На заслонках предусмотрены по три сквозных отверстия

диаметром 70 мм (вставка – труба из жаростойкой стали с заслонкой) на уровне 300+400 мм от уровня пода. Основные характеристики и показатели работы печи приведены в таблице [1].

Таблица

Техническая характеристика печи

Наименование параметра	Значение параметра
Тип печи	Камерная газовая термическая
Размеры рабочего пространства печи, мм:	
– длина	2000
– ширина	2700
– высота	1000
Режим работы	Периодический
Максимальная масса садки, т	0,5
Максимальная масса садки (с учетом подставки), т	0,5
Температура нагрева металла (максимальная), °С	1050
Температура в рабочем пространстве печи (максимальная), °С	1070
Максимальная скорость нагрева садки, °С/ч	300
Топливо и его теплота сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ , кДж/м <sup>3</sup>	Природный газ, 34000
Тип горелок	Рекуперативные, скоростные Ecomax 3M Elster Kromschroder, Германия
Номинальная тепловая мощность горелки 120, кВт	120
Количество горелок, шт.	3
Номинальный расход газа на одну горелку, м <sup>3</sup> /ч	12
Расход газа на печь (max), м <sup>3</sup> /ч	34
Давление природного газа перед печью, кПа	7,0
Давление природного газа перед горелками, кПа	3,0–5,0
Расход воздуха на печь (max), м <sup>3</sup> /ч	927
Давление воздуха перед печью, кПа	14,0
Давление воздуха перед горелками, кПа	12,0
Количество зон теплового регулирования, шт.	1

В данной работе предложен метод исследования газодинамического состояния в рабочем пространстве камерной печи с применением средств компьютерного моделирования.

Работа осуществлялась поэтапно и состояла из двух частей:

- работа с эскизами печи и получение 3D-модели [3];

– расчет газодинамики внутреннего пространства, представление результатов расчета в графическом [2].

Первому этапу работы соответствует создание твердотельной модели печи в пакете КОМПАС-3D. Модель печи создавалась как набор деталей, соответствующих элементам конструкции печи. Несмотря на некоторое конструктивное упрощение, геометрия деталей воспроизводит реальный объект с точностью достаточной для решения поставленной инженерной задачи. Для обеспечения возможности обмена данными твердотельная модель создавалась с учетом стандартов расчетной среды SolidWorks, а именно:

- модель упрощена, мелкие элементы, которые не влияют на решение задачи, не показаны;
- удалены сквозные отверстия, входные и выходные отверстия снабжены крышками;
- определен способ соединения и соблюдены основные присоединительные размеры деталей сборки.

Подготовительные действия выполнялись на стадии подготовки деталей в пакете КОМПАС-3D. Наиболее удовлетворительные результаты обмена информацией получилась между системами КОМПАС-3D и SolidWorks при использовании формата STEP (рис. 1).

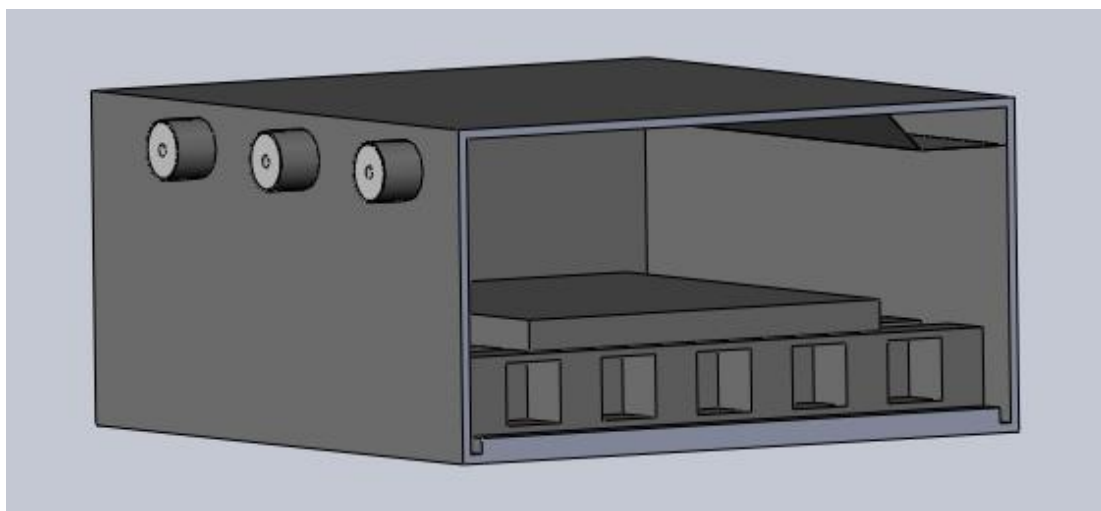


Рис. 1. Модель печи в редакторе SolidWorks

Чтобы сделать решение задачи в программе SolidWorks Flow Simulation возможным, изначально приняли следующие условия:

1. Для исследования газодинамики рабочего пространства печи условно используем, в виде заготовки, твердотельную поверхность.
2. Компоненты газовой среды – не вступающими в химическое взаимодействие между собой.
3. Решаемую задачу считаем стационарной, полагая, что отсутствуют подвижные элементы; геометрия объекта в процессе расчета остается неизменной.

В расчете учли процесс: gravity (гравитация).

На следующем шаге определили газообразные вещества, которые рассмотрены в данном проекте. В списке Gases (газы) выбирали methane (метан) и air

(воздух). Здесь же указали тип течения laminar and turbulent (ламинарный и турбулентный).

Далее задали wall conditions (условия на стенках). По умолчанию для всех поверхностей поставили значение adiabatic wall (адиабатическая стенка).

Следуя инструкциям мастера проекта, перешли к определению расчетной сетки. В данной задаче для качественного отображения результатов расчета оставили автоматически выставленные параметры сетки без изменения. Уменьшение шага расчетной сетки нецелесообразно, так как для решения понадобилось бы больше времени и вычислительных ресурсов.

При решении внутренних задач, когда расчетная область очерчена стенками модели, задали входные (Inlet) и выходные (Outlet) граничные условия текучей среды.

В качестве поверхности, где применено граничное условие, показываем торцевые грани горелок.

В параметрах потока указали значение начальной скорости на срезе сопла горелки  $\omega=150$  м/с [4], давление  $P = 101325$  Па. Выделили на поверхности торцевой стенки отверстие, соответствующее газоотводящему каналу. На выходе в газоотводящий канал указали давление  $P = 101275$  Па (разрежение  $P = -50$  Па).

Результаты расчета SolidWorks Flow Simulation можно наблюдать на рисунке 2.

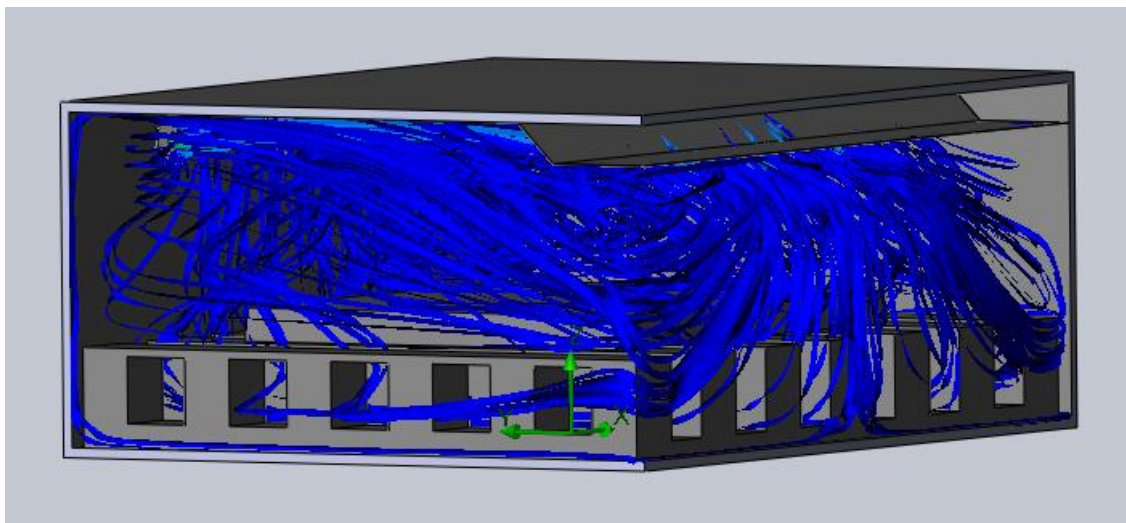


Рис. 2. Траектории движения газовых потоков в рабочем пространстве печи

Полученная картина свидетельствует о эффективном размещении горелочных устройств «Elster Kromschroder Ecomax 3M». Заметно интенсивное и равномерное движение газов по всей области рабочего пространства.

При помощи команды Cut Plot (картина в сечении) получили поле скорости по выбранному сечению. Программа показала распределение параметра в виде градиентных полей. На рис. 3 и 4 изображено поле скорости в некоторых сечениях.

Горизонтальный разрез демонстрирует, что движение газов равномерно затрагивает области рабочего пространства. Потоки устремлены к заслонке печи, где сталкиваясь с притолокой, продолжают двигаться вдоль заслонки.

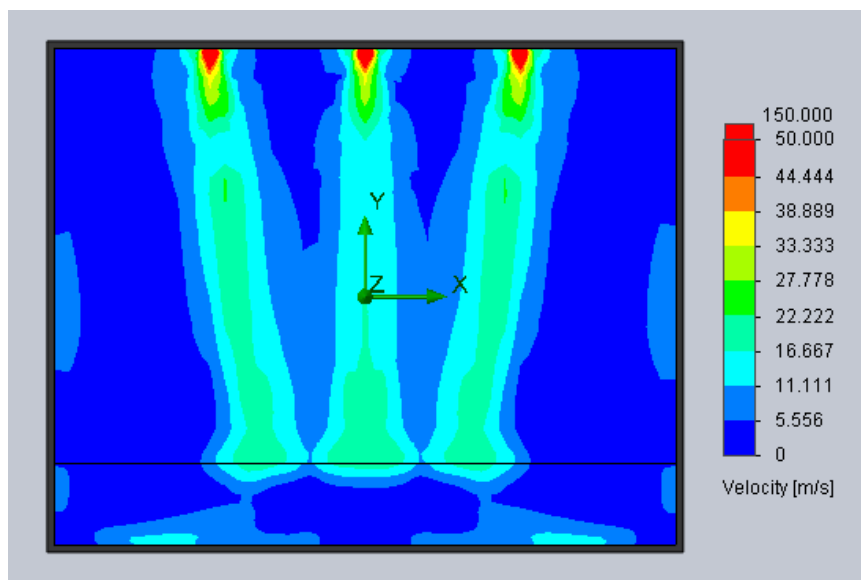


Рис. 3. Распределение поля скоростей в горизонтальном сечении по оси горелочных устройств

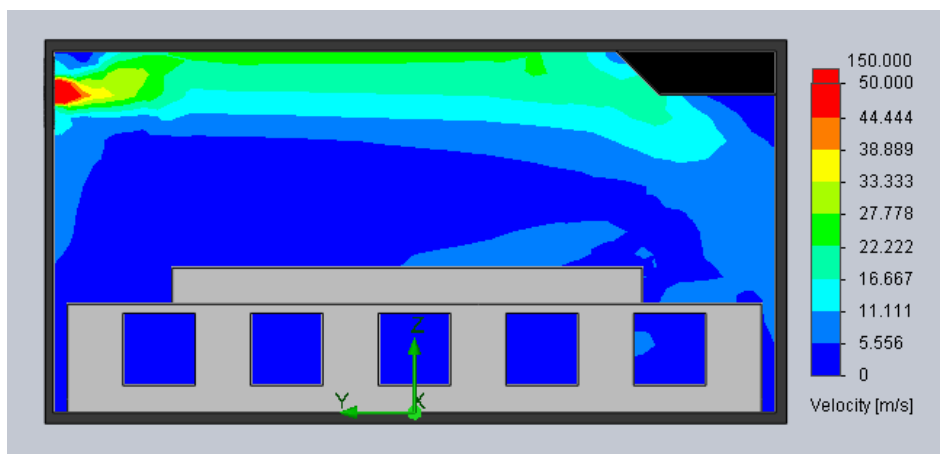


Рис. 4. Распределение поля скоростей в продольном сечении по оси центральной горелки

В результате моделирования и анализа газодинамики рабочего пространства камерной печи с горизонтальной установкой горелок фирмы «Elster Kromschroder» был обнаружен недостаток – формирование неоднородного поля скорости в области нагреваемого металла.

Таким образом следует сделать вывод о том, что предложенная методика компьютерного моделирования газодинамического состояния в рабочем пространстве дает возможность без натурального эксперимента оценить способ подвода горелочных устройств в рабочее пространство камерной печи.

### Список использованных источников

1. Учимся правильно дуть в Solidworks flow simulation [Электронный ресурс]. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/maniak26/learning-how-to-blow-in-solidworks-flow-simulation> (дата обращения: 28.04.2018).

2. Обучающие видео материалы КОМПАС-3D [Электронный ресурс]. URL: <http://kompas.ru/publications/video/> (дата обращения: 25.04.2018).

3. Рекуперативные газовые горелки ECOMAX [Электронный ресурс]. URL: <http://www.kromschroeder.ru/index.php?recuperator> (дата обращения: 25.04.2018).

УДК 669.16.228.001.57

**В. М. Аткин, Н. Б. Лошкарев**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет

имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛИННОПЛАМЕННЫХ ГОРЕЛОК ДЛЯ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ**

### **Аннотация**

*Для отопления вращающихся печей используют в основном длиннопламенные горелки и длина факела является очень важным параметром. В данной работе автором была изложена тема о работе длиннопламенной горелки с защитным факелом для вращающихся печей обжига шамота: схематичное изображение сопла и расчет диаметров горелки для условий, предъявленных в техническом задании. Вкратце говорится о принципе работы самой горелки таких как защитный факел, отрыв потока и его воспламенение на удаленном расстоянии. Говорится о скоростях и процентных соотношениях газа в основном и периферийном потоке, также говорится о горелке розжига, которая стабилизирует горение. В статье также приведены диаметры сечений горелки и толщины стенок в зависимости от условий их нахождения.*

**Ключевые слова:** горелка, длиннопламенная, вращающаяся, печь, факел.

### **Abstract**

*For the heating of rotary kilns, long-flame burners are used and the length of the torch is a very important parameter. In this paper, the author presented the topic of the operation of a long flame torch with a protective torch for rotary kilns of chamotte burning: a schematic image of the nozzle and calculation of the torch diameters for the conditions presented in the technical assignment. In brief, the principle of the operation of the burner itself is described, such as a protective torch, flow separation and its ignition at a remote distance. It is a question of the velocities and percentage ratios of gas in the main and peripheral flow, also it is said about the ignition burner, which stabilizes the combustion. The article also provides the diameters of the burner sections and wall thickness, depending on the conditions of their location.*

**Key words:** Burner, long-flame, rotating, furnace, torch.

**1. Основные положения.** Для отопления вращающихся печей используют, как правило, длиннопламенные горелки. Длина факела является существенным технологическим параметром, определяющим распределение температур по длине технологических зон печи и во многих процессах, должна иметь вполне определенные размеры.

Перед нами стояла задача разработать горелку с длиной факела более 15 м. Для получения факела такой длины была предложена идея, состоящая в том, что основная струя газа, примерно 80 % общего расхода, подается по центральному соплу (рисунок 1) с высокой скоростью, примерно 250...270 м/с. Это позволяет оторвать факел от сопла горелки и заставить его начать горение в том месте, где